

Avaliação do desempenho de Índices de Capacidade tradicionais diante de processos Não-Normais

Eduardo de Oliveira Correa¹

Danilo Marcondes Filho²

Resumo: Índices de capacidade (IC) são amplamente usados para avaliar o desempenho dos processos industriais. Dado um processo operando sob condições estáveis e uma característica de qualidade representada por uma variável aleatória de interesse, os IC basicamente comparam a variabilidade natural dessa variável em relação à amplitude das especificações do processo. Quanto maior a variabilidade, menor a capacidade do processo em produzir unidades dentro das especificações. Destacam-se no meio industrial os IC clássicos Cp, Cpk, disponíveis em rotinas de controle de qualidade. Entretanto, estes índices avaliam a capacidade do processo supondo distribuição Normal para a variável aleatória sob investigação. Devido à complexidade de processos produtivos atuais, as características de qualidade geram dados com distribuições com caldas longas e/ou assimétricas, tornando a avaliação da capacidade destes processos através dos IC clássicos bastante distorcida. Embora exista literatura disponível sobre IC para processos "não-normais", verifica-se pouca aplicação de tais abordagens nas indústrias. Este trabalho replica e estende o estudo de Somerville e Montgomery (1996), apresentando uma avaliação do erro de análise da capacidade de processos utilizando os índices Cp e Cpk, diante de variáveis apresentando distribuições de probabilidade com diferentes formas.

Palavras-chave: *Índices de Capacidade, Distribuição Não-Normal.*

¹UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: eduardo.correa@ufrgs.br

²UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: marcondes.danilo@gmail.com

1 Índices de Capacidade Clássicos

Os índices de capacidade são medidas adimensionais que quantificam a capacidade de um processo estável. São medidos através da relação entre a variabilidade natural do processo e a variabilidade que é permitida a esse processo, dada pelos limites de especificação da variável (característica de qualidade).

1.1 Índices de dados Normais (IC-N)

1.1.1 Índice C_p

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6 \sigma},$$

onde:

LSE: Limite Superior Especificado

LIE: Limite Inferior Especificado

σ : Desvio Padrão do processo

O Índice C_p compara a variabilidade da variável em relação a amplitude da especificação sem avaliar a centralidade da distribuição Normal.

1.1.2 Índice C_{pk}

$$C_{pk} = \min \left(\frac{LSE - \mu}{3 \sigma}; \frac{\mu - LIE}{3 \sigma} \right),$$

onde:

μ : Média do processo

O índice C_{pk} avalia tanto a variabilidade quanto a centralidade da distribuição Normal.

1.2 Índices de Clements para dados Não-Normais (IC-NN)

1.2.1 C'_p

$$C'_p = \frac{LSE - LIE}{F\left(1-\frac{\alpha}{2}\right) - F\left(\frac{\alpha}{2}\right)},$$

onde :

$F\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)$ e $F\left(\frac{\alpha}{2}\right)$: Percentis da distribuição de probabilidade considerada

1.2.2 C'_{pk}

$$C'_{pk} = \left(\frac{LSE - \mu}{F\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \mu}; \frac{\mu - LIE}{\mu - F\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right)$$

Neste estudo admitimos que a distribuição de probabilidade sob investigação possui média centrada, isto é, no ponto médio do limite de especificação. Dessa forma, $C_p = C_{pk}$ (dados Normais) e $C'_p = C'_{pk}$ (dados Não-Normais).

2 Estudo comparativo do Índice C_{pk} (IC-N) em distribuições de probabilidade Não-Normais (Simétricas)

Neste estudo apresentaremos os erros de avaliação de capacidade do processo via o uso de C_{pk} (IC-N) diante de diferentes em duas distribuições de probabilidade simétricas: A distribuição t-Student e a distribuição Beta com parâmetros iguais. A distribuição de t-Student apresenta caudas mais longas e a distribuição Beta apresenta caudas mais curtas em relação a distribuição Normal.

2.1 IC-N Variável t-Student

Considere como exemplo a variável aleatória $X \sim t(gl)$, onde $gl = 5$. Temos então $\mu = 0$ e

$$\sigma = \sqrt{\frac{gl}{gl-2}} = \sqrt{\frac{5}{5-2}} = 1,2910.$$

Sejam $F_N \rightarrow$ Função acumulada distribuição Normal, $F_t \rightarrow$ Função acumulada distribuição t-Student e $NNC \rightarrow$ Número de não conformes em partes por milhão.

Logo:

$$C_{pk_{2\sigma}} = \min\left(\frac{F_{N_{0,9972}} - \mu}{F_{t_{0,9972}} - \mu}; \frac{\mu - F_{N_{0,0228}}}{\mu - F_{t_{0,0228}}}\right) 0,67 = \min\left(\frac{2,5820 - 0}{2,6486 - 0}; \frac{0 - (-2,5820)}{0 - (-2,6486)}\right) 0,67 =$$

$$C_{pk_{2\sigma}} = \text{mín}(0,6531 ; 0,6531) \quad \text{e} \quad NNC = 24656,54$$

$$C_{pk_{3\sigma}} = \min\left(\frac{F_{N_{0,9987}} - \mu}{F_{t_{0,9987}} - \mu}; \frac{\mu - F_{N_{0,0013}}}{\mu - F_{t_{0,0013}}}\right) 1,00 = \min\left(\frac{3,8730 - 0}{5,5071 - 0}; \frac{0 - (-3,87300)}{0 - (-5,5071)}\right) 1,00 =$$

$$C_{pk_{3\sigma}} = \text{mín}(0,7032 ; 0,7032) \quad \text{e} \quad NNC = 5862,41$$

$$C_{pk_{4\sigma}} = \min\left(\frac{F_{N_{0,9997}} - \mu}{F_{t_{0,9997}} - \mu}; \frac{\mu - F_{N_{0,0003}}}{\mu - F_{t_{0,0003}}}\right) 1,33 = \min\left(\frac{5,1640 - 0}{12,2814 - 0}; \frac{0 - (-5,1640)}{0 - (-12,2814)}\right) 1,33 =$$

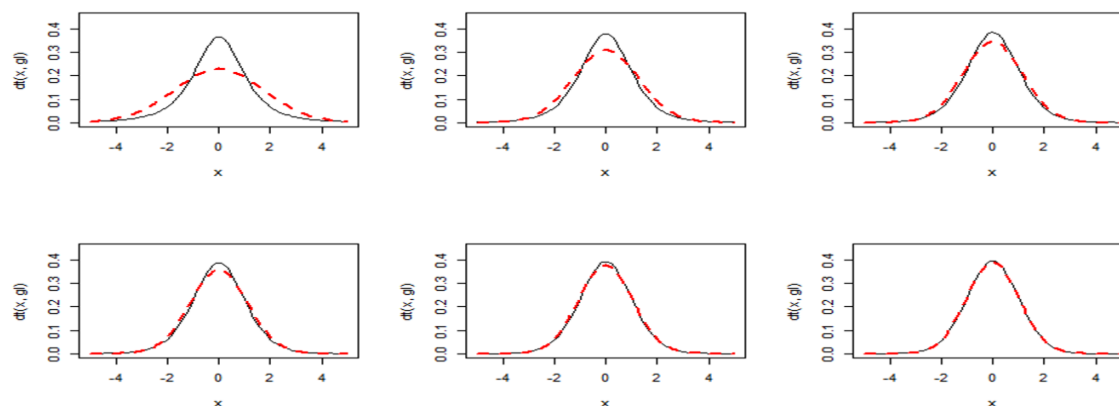
$$C_{pk_{A\sigma}} = \min(0,5592 ; 0,5592) \quad \text{e} \quad NNC = 1786,41$$

A tabela 1 apresenta os resultados do C_{pk} (IC-N) para distribuição t-Student com diversos valores de gl. Observa-se de uma maneira geral que a capacidade do processo é subestimada, visto que a distribuição t tem caudas mais longas do que a distribuição Normal. Este erro de estimativa é atenuado cada vez mais na medida em que aumentamos o parâmetro gl, o que é esperado, pois as caudas tornam-se cada vez mais parecidas em relação a distribuição Normal (ver figura 1).

Tabela 1: C_{pk}^r (C_{pk} real), NNC^r (número real de não-conformes, em partes por milhão), C_{pk} e NNC (supondo distribuição Normal para variável aleatória com distribuição t-student).

t-Student (gl)													
C_{pk}^r	NNC^r	gl = 3				gl = 5				gl = 8			
		C_{pk}		NNC		C_{pk}		NNC		C_{pk}		NNC	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
0,67	22750	0,7018	0,7018	20259,66	20259,66	0,6531	0,6531	24656,54	24656,54	0,6538	0,6538	24867,78	24867,78
1,00	1350	0,5636	0,5636	6923,42	6923,42	0,7032	0,7032	5862,41	5862,41	0,8100	0,8100	4258,13	4258,13
1,33	32,00	0,2825	0,2825	6923,42	6923,42	0,5592	0,5592	1786,41	1786,41	0,8088	0,8088	856,44	856,44
C_{pk}^r	NNC^r	gl = 10				gl = 30				gl = 50			
		C_{pk}		NNC		C_{pk}		NNC		C_{pk}		NNC	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
0,67	22750	0,6538	0,6538	24666,1	24666,1	0,6621	0,6621	23913,74	23913,74	0,6667	0,6667	23261,13	23261,13
1,00	1350	0,8476	0,8476	3657,31	3657,31	0,9240	0,9240	2449,99	2449,99	0,9698	0,9698	1767,7	1767,7
1,33	32,00	0,9057	0,9057	596,73	596,73	1,1136	1,1136	212,08	212,08	1,2433	1,2433	80,27	80,27

Figura 1: Distribuição t-Student (linha sólida) e distribuição suposta Normal (linha pontilhada).



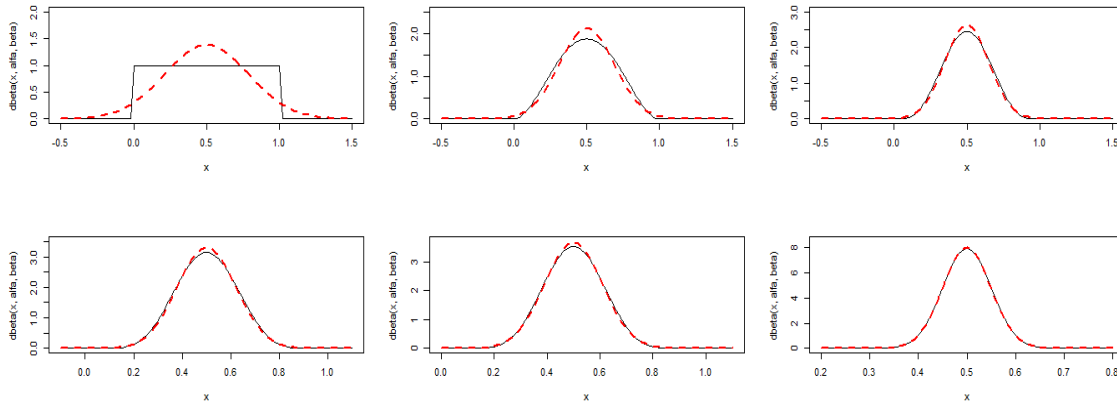
2.2 IC-N Variável Beta

A distribuição Beta com parâmetros α e β iguais é simétrica, assim como a distribuição t-student. Entretanto, observamos na tabela 2 que o Cpk (IC-N) superestima a capacidade do processo, sendo que o erro de estimativa diminui na medida que aumenta o valor do parâmetro, visto que as caudas mais curtas da Distribuição Beta começam a se alongar e se assemelhar as caudas da distribuição Normal (ver figura 2).

Tabela 2: Cpk^r (Cpk real), NNC^r (número real de não-conformes, em partes por milhão), Cpk e NNC (supondo distribuição Normal para variável aleatória com distribuição Beta).

Beta (α ; β) , $\alpha = \beta$													
Cpk^r NNC^r	(1 ; 1)				(3 ; 3)				(5 ; 5)				
	Cpk		NNC		Cpk		NNC		Cpk		NNC		
	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	
0,67	22750	0,8105	0,8105	0	0	0,7067	0,7067	15009,87	15009,87	0,6901	0,6901	18964,49	18964,49
1,00	1350	1,7367	1,7367	0	0	1,2674	1,2674	0	0	1,1579	1,1579	26,55	26,55
1,33	32,00	3,0716	3,0716	0	0	2,0720	2,070	0	0	1,7803	1,7803	0	0
Cpk^r NNC^r	(8 ; 8)				(10 ; 10)				(50 ; 50)				
	Cpk		NNC		Cpk		NNC		Cpk		NNC		
	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	
0,67	22750	0,6818	0,6818	20655,17	20655,17	0,6792	0,6792	21142,79	21142,79	0,6717	0,6717	22470,29	22470,29
1,00	1350	1,0971	1,0971	310,33	310,33	1,0772	1,0772	473,34	473,34	1,0150	1,0150	1153,92	1153,92
1,33	32,00	1,6095	1,6095	0	0	1,5526	1,5526	0,06	0,06	1,3735	1,3735	17,16	17,16

Figura 2: Distribuição Beta (linha sólida) e distribuição suposta Normal (linha pontilhada).



3 Estudo comparativo do Índice C_{pk} (IC-N) em distribuições de probabilidade Não-Normais (Assimétricas)

3.1 IC-N Variável Beta assimétrica à direita

Considere como exemplo a variável aleatória $X \sim B(\alpha; \beta)$, onde $\alpha = 1; \beta = 5$. Temos então $\mu = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} = 0,1667$ e $\sigma = \sqrt{\frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta + 1)(\alpha + \beta)^2}} = 0,1419$

Sejam $F_N \rightarrow$ Função acumulada distribuição Normal, $F_B \rightarrow$ Função acumulada distribuição Beta

e $NNC \rightarrow$ Número de não conformes em partes por milhão.

Logo:

$$C_{pk_{2\sigma}} = \min\left(\frac{F_{N_{0,9972}} - \mu}{F_{B_{0,9972}} - \mu}; \frac{\mu - F_{N_{0,0228}}}{\mu - F_{B_{0,0228}}}\right) 0,67 = \min\left(\frac{0,4484 - 0,1667}{2,6486 - 0,1667}; \frac{0,1667 + 0,1150}{0,1667 - 0,0046}\right) 0,67 =$$

$$C_{pk_{2\sigma}} = \text{mín}(1,1643 ; 0,5184) \quad \text{e} \quad NNC = (0 ; 51071,82)$$

$$C_{pk_{3\sigma}} = \min\left(\frac{F_{N_{0,9987}} - \mu}{F_{B_{0,9987}} - \mu}; \frac{\mu - F_{N_{0,0013}}}{\mu - F_{B_{0,0013}}}\right) 1,00 = \min\left(\frac{0,5892 - 0,1667}{0,7333 - 0,1667}; \frac{0,1667 + 0,2559}{0,1667 - 0,0003}\right) 1,00 =$$

$$C_{pk_{3\sigma}} = \text{mín}(2,5396 ; 0,7458) \quad \text{e} \quad NNC = (0 ; 11692,86)$$

$$C_{pk_{4\sigma}} = \min\left(\frac{F_{N_{0,9997}} - \mu}{F_{B_{0,9997}} - \mu}; \frac{\mu - F_{N_{0,0003}}}{\mu - F_{B_{0,0003}}}\right) 1,33 = \min\left(\frac{0,7301 - 0,1667}{8741 - 0,1667}; \frac{0,1667 + 0,3968}{0,1667 - 0,0000}\right) 1,33 =$$

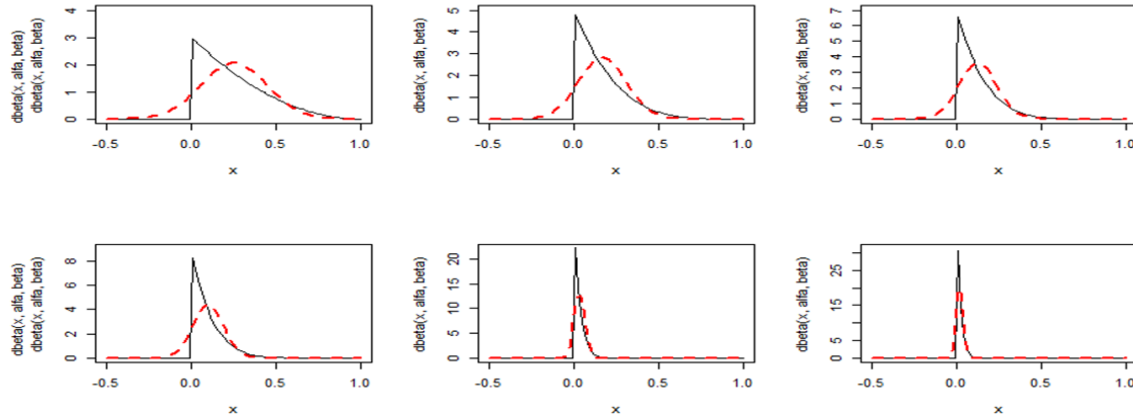
$$C_{pk_{4\sigma}} = \text{mín}(4,4964 ; 1,0593) \quad \text{e} \quad NNC = (0 ; 1432,16)$$

A tabela 3 mostra os valores de C_{pk} (IC-NN) para distribuição Beta com $\alpha = 1$ e diferentes valores do parâmetro β . Esta configuração de parâmetros gera distribuições Beta com caudas esquerdas mais curtas e direitas mais longas em relação a distribuição Normal (ver figura 3), desta forma, o C_{pk} (IC-NN) superestima a capacidade do processo à esquerda e subestima à direita.

Tabela 3: C_{pk}^r (Cpk real), NNC^r (número real de não-conformes, em partes por milhão), C_{pk} e NNC (supondo distribuição Normal para variável aleatória com distribuição Beta).

Beta (α ; β) , $\alpha = 1$													
C_{pk}^r NNC^r		(1 ; 3)				(1 ; 5)				(1 ; 7)			
		C_{pk}		NNC		C_{pk}		NNC		C_{pk}		NNC	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
0,67	22750	1,0707	0,5561	0	47714,31	1,1646	0,5184	0	51071,82	1,2136	0,5050	0	51459,29
1,00	1350	2,328	0,9085	0	4831,31	2,5396	0,7458	0	11692,86	2,6498	0,6806	0	14150,2
1,33	32,00	4,121	1,4341	0	0	4,4964	1,0593	0	1432,16	4,6920	0,9059	0	2902,14
C_{pk}^r NNC^r		(1 ; 9)				(1 ; 30)				(1 ; 50)			
		C_{pk}		NNC		C_{pk}		NNC		C_{pk}		NNC	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
0,67	22750	1,2438	0,4984	0	51412,25	1,3290	0,4854	0	50513,57	1,3455	0,4837	0	50247,69
1,00	1350	2,7176	0,6459	0	15332,63	2,9087	0,5664	0	17617,73	2,9458	0,5536	0	17917,75
1,33	32,00	4,8122	0,8244	0	3787,86	5,1512	0,6396	0	5913,49	5,2168	0,6105	0	6252,02

Figura 3: Distribuição Beta (linha sólida) e distribuição suposta Normal (linha pontilhada).



3.2 IC-N Variável Beta assimétrica à esquerda

Considere como exemplo a variável aleatória $X \sim B(\alpha; \beta)$, onde $\alpha = 5; \beta = 1$. Temos então

$$\mu = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} = 0,8333 \text{ e } \sigma = \sqrt{\frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta + 1)(\alpha + \beta)^2}} = 0,1419$$

Sejam $F_N \rightarrow$ Função acumulada distribuição Normal, $F_B \rightarrow$ Função acumulada distribuição Beta

e $NNC \rightarrow$ Número de não conformes em partes por milhão.

Logo:

$$C_{pk_{2\sigma}} = \min\left(\frac{F_{N_{0,9972}} - \mu}{F_{B_{0,9972}} - \mu}; \frac{\mu - F_{N_{0,0228}}}{\mu - F_{B_{0,0228}}}\right) 0,67 = \min\left(\frac{1,1151 - 0,8333}{0,9954 - 0,8333}; \frac{0,8333 - 0,5515}{0,8333 - 0,4692}\right) 0,67 =$$

$$C_{pk_{2\sigma}} = \min(0,5184; 1,1646) \quad \text{e} \quad NNC = (51071,82; 0)$$

$$C_{pk_{3\sigma}} = \min\left(\frac{F_{N_{0,9987}} - \mu}{F_{B_{0,9987}} - \mu}; \frac{\mu - F_{N_{0,0013}}}{\mu - F_{B_{0,0013}}}\right) 1,00 = \min\left(\frac{1,2560 - 0,8333}{0,9997 - 0,8333}; \frac{0,8333 - 0,4106}{0,8333 - 0,2667}\right) 1,00 =$$

$$C_{pk_{3\sigma}} = \min(0,7458; 2,5396) \quad \text{e} \quad NNC = (11692,86; 0)$$

$$C_{pk_{4\sigma}} = \min\left(\frac{F_{N_{0,9997}} - \mu}{F_{B_{0,9997}} - \mu}; \frac{\mu - F_{N_{0,0003}}}{\mu - F_{B_{0,0003}}}\right) 1,33 = \min\left(\frac{1,3969 - 0,8333}{0,9999 - 0,8333}; \frac{0,8333 - 0,2697}{0,8333 - 0,1259}\right) 1,33 =$$

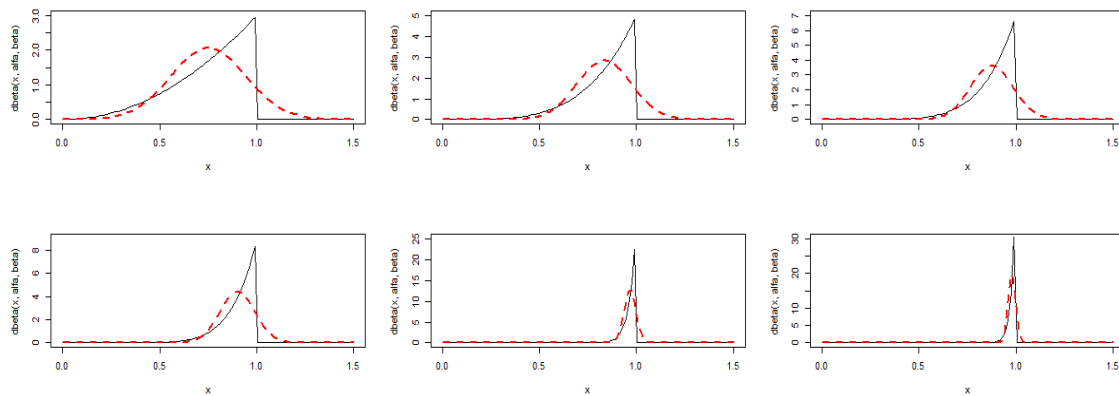
$$C_{pk_{4\sigma}} = \min(1,0593; 4,4964) \quad \text{e} \quad NNC = (1432,16; 0)$$

A tabela 4 mostra os valores de C_{pk} (IC-N) para distribuição Beta com $\beta = 1$ e diferentes valores do parâmetro α . Esta configuração de parâmetros gera distribuições Beta com caudas esquerdas mais longas e direitas mais curtas em relação a distribuição Normal (ver figura 4), desta forma, o C_{pk} (IC-N) subestima a capacidade do processo à esquerda e superestima à direita.

Tabela 4: Cpk^r (Cpk real), NNC^r (número real de não-conformes, em partes por milhão), Cpk e NNC (supondo distribuição Normal para variável aleatória com distribuição Beta).

Beta (α ; β) , $\beta = 1$													
Cpk^r NNC^r		(3 ; 1)				(5 ; 1)				(7 ; 1)			
		Cpk		NNC		Cpk		NNC		Cpk		NNC	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
0,67	22750	0,5561	1,0707	47714,31	0	0,5184	1,1646	51071,82	0	0,5050	1,2136	51459,29	0
1,00	1350	0,9085	2,328	4831,31	0	0,7458	2,5396	11692,86	0	0,6806	2,6498	14150,2	0
1,33	32,00	1,4341	4,121	0	0	1,0593	4,4964	1432,16	0	0,9059	4,6920	2902,14	0
Cpk^r NNC^r		(9 ; 1)				(30 ; 1)				(50 ; 1)			
		Cpk		NNC		Cpk		NNC		Cpk		NNC	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
0,67	22750	0,4984	1,2438	51412,25	0	0,49	1,329	50513,57	0	0,4837	1,3455	50247,7	0
1,00	1350	0,6459	2,7176	15332,63	0	0,57	2,9087	17617,73	0	0,5536	2,9458	17917,75	0
1,33	32,00	0,8244	4,8122	3787,86	0	0,6396	5,1512	5913,49	0	0,6105	5,2168	6252,02	0

Figura 4: Distribuição Beta (linha sólida) e distribuição suposta Normal (linha pontilhada).



3.3 IC-N Variável Qui-Quadrado e Gama

As distribuições Qui-Quadrado e Gama são assimétricas à direita, conforme ilustrado nas figuras 5 e 6, respectivamente. As tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, os resultados do Cpk (IC-N) para tais distribuições. Investigamos a distribuição Qui-Quadrado com diversos valores do parâmetro gl e a distribuição Gama fixando o valor do parâmetro $\beta = 1$ e variando os valores do parâmetro α . De maneira análoga ao resultado mostrado na seção 3.2, para ambas as distribuições observamos que o Cpk (IC-N) superestima a capacidade à esquerda e subestima a capacidade à direita.

Tabela 5: Cpk^r (Cpk real), NNC^r (número real de não-conformes, em partes por milhão), Cpk e NNC (supondo distribuição Normal para variável aleatória com distribuição Qui-Quadrado).

Qui-Quadrado (gl)													
Cpk^r NNC^r		gl = 3				gl = 5				gl = 8			
		Cpk		NNC		Cpk		NNC		Cpk		NNC	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
0,67	22750	1,1731	0,5007	0	48146,29	1,0081	0,5252	0	45311,49	0,9346	0,5407	0	42380,11
1,00	1350	2,4739	0,5818	0	15824,85	1,9921	0,6400	0	12795,52	1,7694	0,6770	0	10336,05
1,33	32,00	4,3472	0,6354	0	5094,54	3,3997	0,7217	0	3419,89	2,9333	0,7781	0	2291,79
Cpk^r NNC^r		gl = 10				gl = 20				gl = 50			
		Cpk		NNC		Cpk		NNC		Cpk		NNC	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
0,67	22750	0,8921	0,5518	220,61	40976,25	0,7735	0,5966	4634,71	36854,11	0,7469	0,6111	11164,78	32374,11
1,00	1350	1,6404	0,7034	0	9309,63	1,2877	0,8120	0	6717,83	1,2113	0,8480	46,95	4482,66
1,33	32,00	2,6568	0,8193	0	1880,92	1,9022	0,9959	0	1005,19	1,7453	1,0571	0	449,25

Figura 5: Distribuição Qui-Quadrado (linha sólida) e distribuição suposta Normal (linha pontilhada).

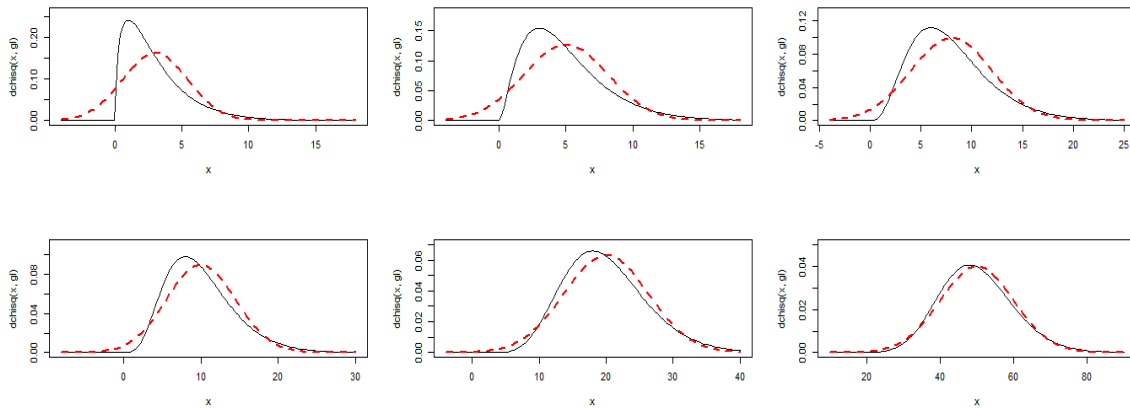
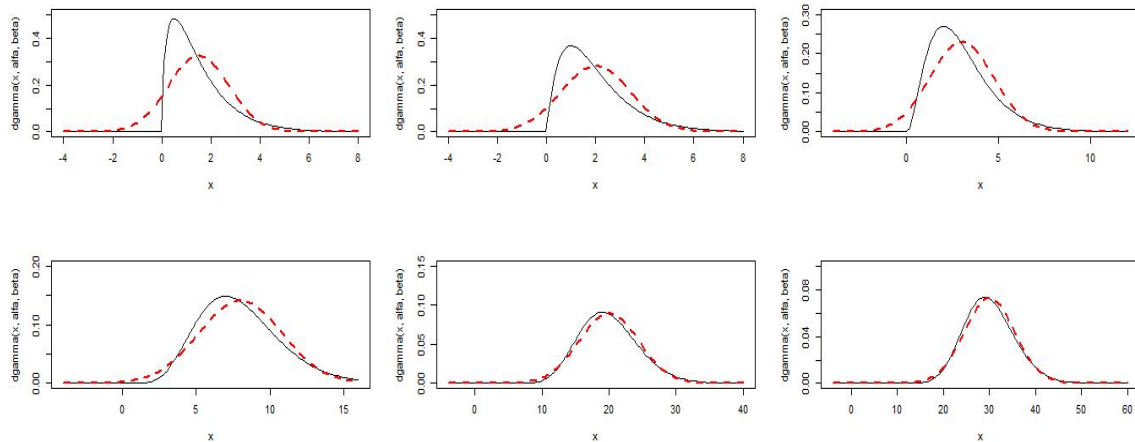


Tabela 6: Cpk^r (Cpk real), NNC^r (número real de não-conformes, em partes por milhão), Cpk e NNC (supondo distribuição Normal para variável aleatória com distribuição Gama).

Gama (α ; β) , $\beta = 1$													
Cpk^r NNC^r	(1,5 ; 1)				(2 ; 1)				(3 ; 1)				
	Cpk		NNC		Cpk		NNC		Cpk		NNC		
	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	
0,67	22750	1,1731	0,5007	0	48146,29	1,0707	0,5145	0	46622,13	0,9655	0,5337	0	44190,36
1,00	1350	2,4739	0,5818	0	15824,85	2,1789	0,6148	0	14084,86	1,8635	0,6602	0	11796,25
1,33	32,00	4,3472	0,6354	0	5094,54	3,7768	0,6840	0	4092,89	3,1324	0,7524	0	2937,14
Cpk^r NNC^r	(8 ; 1)				(20 ; 1)				(30 ; 1)				
	Cpk		NNC		Cpk		NNC		Cpk		NNC		
	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	
0,67	22750	0,8222	0,5751	2894,21	38125,28	0,7574	0,6051	9766,98	33349,5	0,7393	0,6156	12204,2	31632,3
1,00	1350	1,4303	0,7593	0	7456,84	1,2414	0,8331	19,21	4923,3	1,1899	0,8594	79,84	4163,75
1,33	32,00	2,2042	0,9087	0	1230,64	1,8061	1,0314	0	543,19	1,7009	1,0768	0	386,3

Figura 6: Distribuição Gama (linha sólida) e distribuição suposta Normal (linha pontilhada).



4 Considerações Finais

Este trabalho replicou e estendeu o estudo de Sommerville e Montgomery (1996), quantificando os erros de avaliação da capacidades de processos utilizando os Índices C_p e C_{pk} quando a variável envolvida não possui distribuição Normal. As distorções de tais índices foram evidenciadas considerando processos com variáveis apresentando distribuições t-Student, Qui-Quadrado, Gamma e Beta, configurando uma ampla variedade de formas distintas da distribuição Normal.

Referências

- [1] MONTGOMERY, D. C. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC ? Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2004.
- [2] WERNER, Liane; GONÇALEZ, Patrícia U. Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais, Gest. Prod., São Carlos, v. 16, n. 1, p. 121-132, jan.-mar. 2009;
- [3] SOMERVILLE, S. E., MONTGOMERY, D. C. (1996). Process capability indices and non-normal distributions. Quality Engineering, 9(2), 305-316.